

УДК 621.039.53

**МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ В РЕАКТОРЕ МИР ТОПЛИВА ВВЭР-1000
В УСЛОВИЯХ АВАРИИ С ВЫБРОСОМ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА***Алексеев А.В., Киселева И.В., Овчинников В.А., Шулимов В.Н. (ГНЦ РФ — НИИАР)*

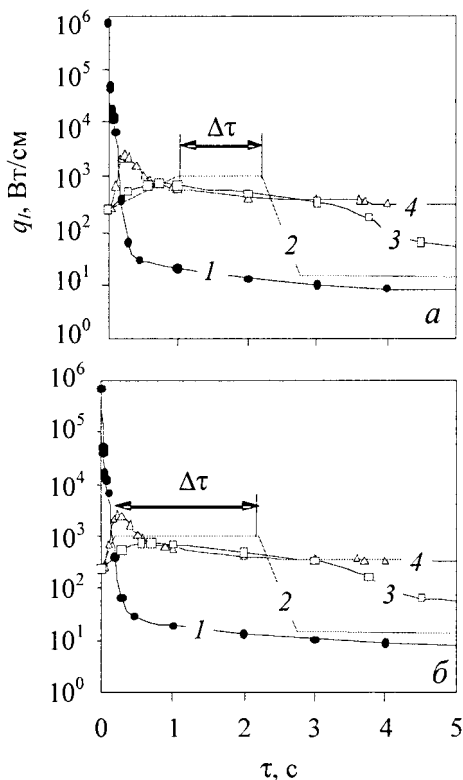
К настоящему времени выполнен большой объем расчетно-экспериментальных исследований, направленных на изучение поведения топлива ВВЭР в условиях импульсного возрастания мощности в результате введения положительной реактивности. Основная цель работы состояла в определении условий безопасной эксплуатации твэлов. В качестве критерия безопасности принята максимальная средняя по радиусу энтальпия топлива. Эксперименты выполнены на импульсных реакторах ИГР и БИГР, где реализуются, в основном, импульсы с большой амплитудой изменения мощности и полушириной 10—900 мс. Максимальная средняя по радиусу энтальпия топлива составляла 190—240 кал/г в различных экспериментах [1]. Результатом исследований явилось определение условий, при которых происходят разгерметизация оболочки твэла и фрагментация топлива.

Эксперименты на импульсных реакторах реализованы из холодного состояния твэлов (20 °С), которое имеет место только в пусковом режиме. При испытании твэлов ВВЭР с высоким выгоранием топлива внешнее давление на оболочку не превышало 0,1 МПа. Все случаи разгерметизации оболочки получены только при таком внешнем давлении [1].

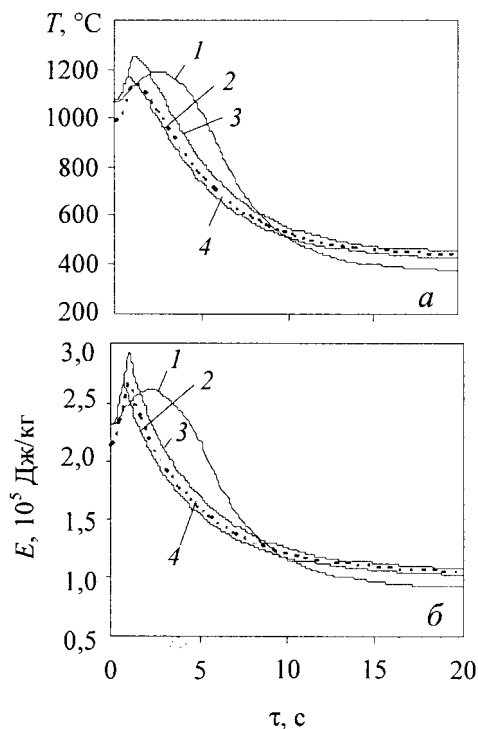
Таким образом, в экспериментах на импульсных реакторах не моделируется термомеханическое состояние твэлов, характерное для проектной аварии с введением положительной реактивности при работе установки на номинальном режиме. Следовательно, получаемые данные не позволяют оценить состояние твэлов и радиационные последствия аварии с приемлемой степенью консервативности. Для такой оценки необходимы экспериментальные данные, полученные при испытании твэлов в условиях, максимально приближенных к условиям работы штатных твэлов ВВЭР, когда исходным состоянием установки перед наступлением проектной аварии с введением положительной реактивности является работа на номинальном режиме. Параметры импульса нейтронного потока в эксперименте должны быть максимально близкими к расчетным параметрам импульса для проектной аварии с введением положительной реактивности на ВВЭР: полуширина 1—1,5 с, амплитуда 1,5—2,5 (для ВВЭР-1000).

В настоящее время нет специализированной экспериментальной базы для проведения динамических экспериментов с импульсным возрастанием мощности. Для постановки экспериментов в качестве экспериментальной базы выбран МИР, при котором имеются действующие петлевые установки с параметрами первого контура охлаждения ВВЭР-1000. Большая высота активной зоны реактора (1 м) создает хорошие предпосылки для формирования импульса заданных параметров.

МИР работает на постоянной мощности, поэтому импульс принципиально может быть реализован только в объеме одного экспериментального канала. Отсюда всегда есть ограничения на достижение расчетных параметров импульса (амплитуды и полуширины). Связано это с тем, что физические возможности активной зоны реактора определены проектными характеристиками. Технические средства также



Р и с. 1. Форма нейтронного импульса в целом для твэла (а) и одного сечения (б) БИГР [2] (1), МИР (2), с выбросом ОР СУЗ ВВЭР-1000 [2] (3), АРК ВВЭР-440 [2] (4)



накладывают ограничения на получение заданной формы импульса. Поэтому была изучена возможность вариации формы импульса в некоторых пределах без существенного изменения термомеханического состояния твэла. В результате расчетного исследования показано, что для случая проектной аварии с введением положительной реактивности достаточно обеспечить в эксперименте максимальную энтальпию топлива и среднюю по радиусу температуру топлива.

На рис. 1, 2 видно, что замена треугольной формы импульса на трапециoidalную с измененными параметрами не приводит к заметной деформации распределения температуры топлива и соответственно максимальной энтальпии топлива. Регулирующим параметром, который компенсирует ограниченные возможности реализации расчетного импульса в канале исследовательского реактора, является время выдержки на максимальной линейной мощности, которое реально можно изменять в пределах 0,5—3 с без изменения состояния топлива.

Эффективным способом создания импульса в одном канале реактора является удаление из канала поглотителя нейтронов, который в исходном состоянии экранирует экспериментальные твэлы. Твэлы остаются неподвижными, что обеспечивает возможность оснащения экспериментальной ТВС необходимыми датчиками контроля. При экранировании топлива в исходном состоянии стартовая тепловая мощность твэла достигается при большой мощности реактора, что обеспечивает высокую амплитуду

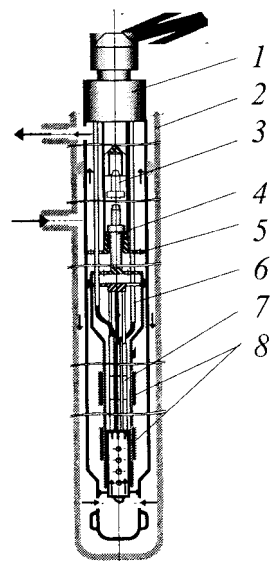
Р и с. 2. Температура в центре сердечника (а) и средняя по радиусу энтальпия выгоревшего твэла (б) при выбросе ОР СУЗ ВВЭР-1000 (1), МИР при начальной линейной мощности 250 Вт/см, амплитуде импульса 3,25, времени выдержки на максимальной мощности 0 (2) и 0,5 с (3), начальной линейной мощности 220 Вт/см и времени выдержки на максимальной мощности 0 с (4)

импульса при удалении поглотителя. Такой способ создания импульса, в сущности, основывается на практической возможности разработки технических средств для удаления поглотителя из канала с высокой скоростью. Например, от перемещения твэла (твэлов) в область с более высокой плотностью нейтронного потока пришлось отказаться ввиду низкой эффективности и значительного усложнения экспериментального канала. Конструктивно поглощающий элемент выполнен в виде цилиндрического экрана, максимально приближенного к твэлам для повышения эффективности работы поглотителя.

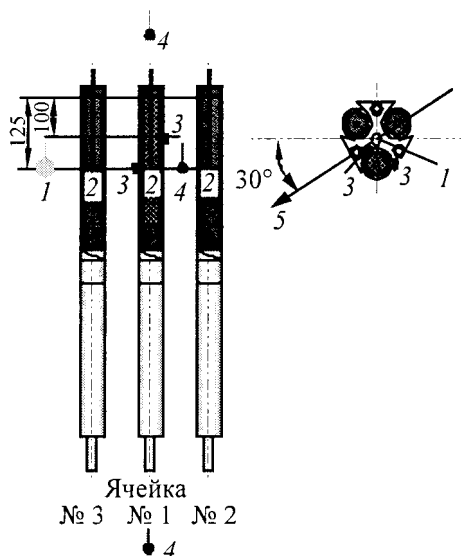
Неотъемлемым условием постановки экспериментов в канале ядерного реактора является их безопасность и прежде всего ядерная. При удалении поглотителя из канала в активной зоне реактора возникает положительная реактивность, которая должна быть скомпенсирована либо полностью, либо в достаточной степени, чтобы требования нормативных документов не нарушались. Для компенсации положительной реактивности в канал вводится дополнительный поглотитель в виде пластин из гафния, расположенных ниже центра активной зоны реактора. Пластины совместно с экраном перемещают в область с повышенной плотностью потока нейтронов, не занятую испытываемыми твэлами. Конфигурация, геометрические размеры и взаимное расположение поглощающих элементов определяются по результатам нейтронно-физического расчета. Исходными данными для расчета являются заданная амплитуда импульса и требование минимальной отрицательной реактивности при перемещении элементов из поглотителя. В качестве материала поглотителя выбран гафний, допускающий работу при 300—350 °С. Способ создания импульса в одном канале реактора запатентован [3].

Конструкция экспериментального канала показана на рис. 3. Экспериментальная ТВС представляет собой фрагмент ТВС ВВЭР-1000, что создает аналогичные условия охлаждения твэлов. При использовании в экспериментальной ТВС цилиндрического чехла применено гидравлическое профилирование граничных и угловых проходных ячеек путем установки вытеснителей. ТВС содержит два твэла с выгоревшим и один твэл со свежим топливом. Общая длина твэлов составляет 250 мм при длине топливного столба 200 мм. Для гидродинамической стабилизации потока теплоносителя к нижнему торцу предварительно загерметизированного твэла приварены трубки. Установка измерительных датчиков показана на рис. 4.

Поглощающие экран и пластины из гафния для компенсации положительной реактивности конструктивно объединены в одно экранирующее устройство, которое выполнено в виде трубы с закрепленными на ней пластинами из гафния. Размеры пластин и координаты их установки определяются расчетом. Для перемещения экранирующего устройства в осевом направлении применен гидропривод с использованием потенциальной энергии среды в канале (статическое дав-



Р и с. 3. Экспериментальный канал: 1 — головка петлевого канала; 2 — корпус; 3 — полость гидроцилиндра; 4 — гидравлический поршень; 5 — удлинительная трубка для прокладки кабелей связи термоэлектрических преобразователей; 6 — разделитель; 7 — твэлы; 8 — подвижные экраны



Р и с. 4. Размещение детектора прямого заряда (1), термоэлектрического преобразователя в центре топливного сердечника (2), на оболочке твэла (3), в теплоносителе (4) ячейки № 1 (со свежим топливом), № 2, 3 (с выгоревшим топливом) (5 — центр активной зоны)

родействие и точность. Для проведения такого эксперимента разработана система регистрации с частотой записи измеряемых величин до 100 Гц. Как показал опыт проведения экспериментов, этого достаточно для производства импульсов заданной длительности (погрешность измерения времени около 0,05 с) и записи на ЭВМ быстропеременных величин.

В настоящее время завершены все стадии подготовки и проведения динамического эксперимента: разработка проекта экспериментального оборудования, изготовление испытательного канала и систем измерения параметров, стендовая отработка отдельных элементов, комплексная проверка работоспособности всего оборудования с определением основных характеристик.

Разработан следующий алгоритм проведения экспериментов: вывод реактора на мощность, необходимую для реализации заданного теплового состояния твэлов, работа реактора на стационарной мощности в течение заданного времени, реализация импульса в канале и останов реактора в расчетное время сбросом стержней аварийной защиты по штатной для реактора технологии, расхолаживание твэлов в течение расчетного времени.

В процессе эксперимента измеряются:

технологические параметры первого контура петлевой установки — давление, расход теплоносителя, температура теплоносителя в различных точках;

параметры твэлов и экспериментальной ТВС — температура центра топливного сердечника каждого твэла, показания двух термоэлектрических преобразователей, установленных на оболочке твэла со свежим топливом, температура теплоносителя в четырех точках по высоте ТВС, относительная мощность энерговыделения с помощью малоинерционного детектора прямого заряда с эмиттером из гафния. При импульсе параметры твэлов и ТВС фиксируются с частотой 100 Гц.

ление), что обеспечивает его высокую энерговооруженность. Пуск гидропривода осуществляется путем соединения камеры над поршнем гидроцилиндра привода с атмосферой через дроссель с расчетным сопротивлением. Система пуска гидропривода расположена за пределами канала. Экранирующее устройство возвращается в исходное положение под действием собственной массы. Стендовые испытания показали, что время полного перемещения (320 мм), которое определяет скорость перемещения фронта импульса вдоль топливного сердечника, составляет 0,8—1,5 с в зависимости от противодействия над поршнем гидропривода.

Скоротечность эксперимента (время полного цикла составляет 2—5 с) диктует требования к системе регистрации параметров и управления экспериментом. Основными требованиями к системе являются быст-

Опыт обработки результатов показывает, что такая совокупность средств измерения достаточна для расчетно-экспериментального определения условий испытания, необходимых для описания состояния твэлов. Все основные параметры и характеристики предложенной методики подтверждены экспериментально.

При проведении экспериментов в каналах реактора возможны два режима охлаждения твэлов: без кризиса теплообмена и в условиях локального кризиса первого рода. Выбор режима охлаждения задается конкретной программой эксперимента.

Разработанные методика и методология проведения динамических экспериментов на реакторе МИР значительно повышают его возможности для отработки твэлов ВВЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nechaeva O., Medvedev A., Novikov V. и др. Researches of WWER fuel rods behaviour under RIA accident conditions. — In: Proc. of the Fifth Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, 29 September — 3 October 2003, 2004, p. 309—318.
2. Гончаров А.А., Кумачев А.В., Медведев А.В. и др. Оценка разгерметизации твэлов ВВЭР в проектных авариях. — В сб.: Межд. научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 23—26 мая 2005, секция № 4, доклад № 8.
3. Способ и устройство для испытания твэлов в режиме реактивной аварии в стационарно работающем исследовательском ядерном реакторе. Патент № 2243605 от 11.02.2003. — Бюлл. «Изобретения и полезные модели», 2004, № 36, с. 980—981.

Поступила в Редакцию 19.07.06

УДК 621.039.534.63

ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ГРАФИТ—НАТРИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПОВОРОТНОЙ КОЛОННЕ БН-600

*Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Орлова Е.А., Гаврилова Н.В., Ковалев Ю.П.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)*

Исследование взаимодействия графита с натрием представляет как научный, так и практический интерес. В частности, графит содержится внутри центральной поворотной колонны реактора БН-600, которая находится в непосредственном контакте с жидким натрием.

Графит характеризуется слоистой структурой. Параметры кристаллической решетки таковы: $a = 2,46 \cdot 10^{-10}$ м в плотно упакованных слоях с гексагональной структурой и $c = 6,7 \cdot 10^{-10}$ м (удвоенное расстояние между слоями) [1, 2].

Взаимодействие натрия с графитом определяется степенью упорядоченности углеродной структуры, наличием в системе примесей и пористостью [3—5]. При пропитке графита щелочной металл из пор проникает в упорядоченную структуру углеродного каркаса, образуя слоистые соединения (графитиды) вида MeC_n . Это приводит к росту расстояния между плоскостями с плотной упаковкой атомов, распуханию каркаса и образованию трещин. Максимальная степень внедрения натрия в матрицу графита соответствует химической форме NaC_8 [3].